

Подготовка начальных данных для моделей лесных ресурсов на основе данных дистанционного зондирования Земли

А. К. Попова

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

Контактный автор: Попова Анастасия Константиновна, e-mail: chudnenko@icc.ru

Поступила 10 октября 2023 г., принята в печать 17 октября 2023 г.

Модели динамики лесов позволяют оценивать разные сценарии изменения экосистемы, необходимые для принятия решений о восстановлении поврежденных лесов, планирования вырубок, мер по охране и защите лесов. Начальной информацией для таких моделей обычно служат данные о распределении деревьев определенных пород и возраста на исследуемой территории. В работе предложена методика обработки данных из открытых источников, которая может использоваться для подготовки начальных данных для моделей лесных ресурсов. Проведено сравнение различных источников начальных данных для моделей.

Ключевые слова: спутниковые данные, модели лесных ресурсов, моделирование динамики лесов, данные дистанционного зондирования Земли.

Цитирование: Попова А.К. Подготовка начальных данных для моделей лесных ресурсов на основе данных дистанционного зондирования Земли. Вычислительные технологии. 2023; 28(6):135–150. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.012.

Введение

Прогнозирование состояния лесных экосистем необходимо для управления лесными ресурсами и определения стратегий их использования [1, 2]. Модели позволяют формировать разные сценарии ведения лесного хозяйства, имитировать запланированные воздействия и получать прогнозные данные развития насаждений, выдавая оценки долгосрочных экологических и экономических последствий всех вариантов лесопользования [3, 4]. Полученные оценки призваны предотвратить нежелательные изменения в экосистемах, такие как сокращение площади лесов, уменьшение биоразнообразия и ухудшение качества почвы.

Для территорий размера района и региона используются модели лесных ландшафтов, охватывающие пространственный масштаб 100–10 000 км² во временном диапазоне от нескольких десятилетий до сотен лет. Для большинства моделей лесных ландшафтов в качестве входных данных для расчетов необходимы карты растительности, содержащие информацию об определенных характеристиках произрастающих в исследуемой местности деревьев (порода, возраст, объем биомассы и т. п.).

К наиболее часто используемым мировым сообществом моделям лесов относятся LANDIS-II, LandClim, LPJ-GUESS, ZELIG, JABOWA, ForClim, TreeMig. В модели

ZELIG [5] лес представлен сеткой из отдельных ячеек. Для каждой ячейки моделируются процессы роста, гибели и возобновления деревьев, а пространственные отношения между ячейками влияют на учет освещенности каждой из них. Модель LandClim [6] предназначена для изучения пространственной динамики лесов в ландшафтном масштабе. Базовая сущность — когорта деревьев — в LandClim всегда связана с отдельной ячейкой сетки, для которой на этапе инициализации кроме породно-возрастного состава и климатических данных также требуется определить такие параметры рельефа, как высота, наклон и аспект. Модель iLand учитывает эффекты изменения климата, конкуренцию между деревьями и другими растениями, а также влияние антропогенного фактора. Базовой сущностью являются отдельные деревья, на их уровне моделируются процессы роста, смертности и конкуренции.

Одна из наиболее распространенных моделей — LANDIS-II (landscape disturbance and succession model) [7–9] — разработана для исследования динамики лесных экосистем на основе процессов нарушений и сукцессии. Эта модель учитывает различные типы нарушений, такие как пожары, ветровалы и болезни, а также процессы сукцессии, такие как рост деревьев и конкуренция между ними. Набор данных для инициализации LANDIS-II зависит от используемого расширения сукцессии — в самом простом варианте это информация о породах деревьев и их возрастных классах (age-only succession), максимальные объемы наземной биомассы и чистой продуктивности, данные о климате (biomass succession), параметры дыхания и фотосинтеза пород деревьев (PnET succession), почвы, параметры азота и углерода (NECN succession).

Таким образом, большинству широко используемых ландшафтных моделей нужна информация о породах и возрастных классах деревьев. Сбор такой информации приемлемой точности для больших площадей является сложной задачей, часто требующей комбинирования данных из разных источников [10]. С ростом размера территории исследования затрудняется проведение полевых работ, также не всегда возможных из-за рельефа и низкой транспортной доступности местности. Во многих исследованиях (см., например, [11–14]) в качестве исходных используют имеющиеся данные инвентаризации лесов (национальные или региональные кадастры), которые содержат подробные сведения о видах лесов, возрасте деревьев, их диаметре, высоте, наличии и характере нарушений. При отсутствии таких данных инициализация лесной ландшафтной модели становится непростой задачей.

При решении проблемы нехватки данных инвентаризации для ландшафтных моделей можно использовать базы данных на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из открытых источников [15, 16]. Развитие спутниковых инструментов позволяет получать регулярную информацию о состоянии различных экосистем в любой точке земного шара. Цель настоящей работы — описать доступные открытые источники данных для инициализации лесной ландшафтной модели, сравнить их возможности и представить пошаговый процесс сбора и комплексирования информации для составления карты начального состояния лесного ландшафта.

1. Материалы и методы

1.1. Используемая модель

Для моделирования динамики лесов в качестве тестовой территории было выбрано Голоустненское лесничество Иркутской области [17]. Его территория на 95 % покрыта лесами, а породно-возрастной состав в целом характерен для Иркутской области. В ра-

боте инициализация ландшафтной модели показана на примере LANDIS-II, одной из наиболее широко используемых научным сообществом в настоящее время. Она включает в себя библиотеку расширений для имитации различных экосистемных процессов на уровне насаждений и ландшафтов (сукцессия, пожары, ветер, рубка, болезни деревьев), а также основной модуль, который организует взаимодействие расширений [5, 6, 18].

В LANDIS-II лесной ландшафт представлен сеткой взаимодействующих ячеек, внутри которых происходят процессы на уровне древостоя, при этом процессы на уровне ландшафта, такие как распространение семян деревьев и повреждения, затрагивают несколько соседних ячеек. Каждый класс возраста одного вида в модели представляет собой когорту, а каждая когорта соревнуется за ресурсы (освещенность, влажность почвы, пространство) среди разных видов на одном участке. Разрешение ячеек и временные шаги в LANDIS-II определяются пользователем. Ландшафт может быть разделен на несколько экорегионов, каждый из которых объединяет ячейки со сходными экологическими условиями, влияющими на динамику леса.

Моделирование проводилось на период в 200 лет, для исследования сукцессии было использовано расширение Biomass Succession, которое моделирует динамику биомассы каждой когорты в зависимости от возраста, конкуренции и воздействий. Входными данными служат карта начального состояния лесных участков, карта экорегионов и таблица параметров пород, дополнительно требуются данные по объемам биомассы и климату. В климатические данные для настройки модели входят среднемесячные значения минимальной и максимальной температуры воздуха, количества осадков.

Для инициализации LANDIS-II были рассмотрены варианты источников данных, приведенные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Источники данных

Table 1. Data sources

| Тип данных | Название | Описание |
|--------------------------|---|--|
| Классификация по породам | FROM-GLC | Finer Resolution Observation and Monitoring, http://data.starcloud.pcl.ac.cn . Данные за 2015 г. с разрешением 30 м по группам пород |
| | GLC_FCS30-2020 | Global Land Cover with Fine Classification System |
| Биомасса | Global forest watch | Надземная биомасса за 2000 г., разрешение 30 м https://data.globalforestwatch.org |
| | GlobBiomass | Надземная биомасса за 2010 г., разрешение 100 м https://globbiomass.org |
| | ESA Biomass Climate Change Initiative | Надземная биомасса за 2010, 2017 и 2018 г., разрешение 100 м https://climate.esa.int/en/projects/biomass |
| Климатические переменные | WorldClim | Исторические среднемесячные климатические данные в растровом виде https://www.worldclim.org |
| | MOD16A3GF | MODIS Version 6.1 Evapotranspiration/Latent Heat Flux. Суммарная эвапотранспирация за год с разрешением 500 м. https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3gfv061 |
| Участки и регионы | Квартальная сеть | Карта кварталов из материалов лесной инвентаризации |
| Почва | Единый государственный реестр почвенных ресурсов России | Почвенная карта России масштаба 1:2 500 000 http://egrpr.soil.msu.ru |

1.2. Породы деревьев

При формировании входных данных для моделей лесных ресурсов надо определить породу и возраст деревьев на исследуемой территории, разбитой на участки с заданным шагом. С развитием методов машинного обучения и улучшения качества данных ДЗЗ стало возможным выделять на снимках отдельные породы деревьев [19–23]. В настоящее время разработан ряд классификаций, в набор классов которых входят разные виды деревьев или их группы (хвойные, широколиственные и т. п.) [24–26]. Современные продукты ДЗЗ с разрешением 30 м позволяют создавать карты породного состава, достаточные для моделей лесных ландшафтов.

Классификация FROM-GLC (finer resolution observation and monitoring — global land cover, <http://data.starcloud.pcl.ac.cn>) содержит глобальные данные о классах земной поверхности за 2017 г. с разрешением 10 м и за 2015 г. с разрешением 30 м. Хотя данные за 2017 г. имеют лучшее разрешение, но в наборе классов отношение к деревьям имеют только “лес” и “кустарники”. В данных за 2015 г. класс “лес” делится на “широколиственные”, “хвойные” и “смешанные”, каждый подкласс включает дополнительные подкатегории — “с листьями” и “без листьев”.

Классификация GLC_FCS30-2020 (global land cover with fine classification system at 30 m in 2020, https://zenodo.org/record/4280923#.Y-WyTC_P0Q8) [27] является обновленной версией GLC_FCS30-2015. Для создания классификации использовались временные серии снимков Landsat, радарные данные Sentinel-1, данные о рельефе DEM. Классы видов деревьев включают “вечнозеленые”, “лиственные”, “хвойные”, “листопадные хвойные”, “смешанные”, каждый из которых включает категории “сомкнутых” и “несомкнутых” деревьев. Также есть класс “кустарники” с подкатегориями “лиственные” и “хвойные”. Конечно, эти классификации дают информацию не о конкретных породах, а только об их группах. При наличии материалов классификации области исследования с хорошей точностью, основанных на региональной обучающей выборке по конкретным породам, следует использовать их. Однако при недостатке таких материалов описанные выше глобальные продукты становятся правильным выбором на начальном шаге сбора данных для ландшафтных моделей. Ведь даже отделение хвойных и лиственных пород дает достаточно информации для лесного хозяйства, особенно если в области исследования произрастает не много лесообразующих пород — на выбранной нами территории их всего семь.

1.3. Возраст деревьев

Получить информацию о возрасте деревьев также можно из данных ДЗЗ. Возраст дерева определенной породы напрямую связан с его биомассой, один из источников данных об объеме биомассы на территории — карты наземной биомассы (above ground biomass, AGB). AGB — живая растительность над почвой, включая стебель, пень, ветки, кору, семена и листву, выраженная в виде массы на единицу площади.

Существует несколько глобальных наборов данных AGB:

- Global forest watch (<https://data.globalforestwatch.org>) — карта с разрешением 30 м по измерениям 2000 г. Надземная биомасса рассчитана с помощью 700 000 точек LiDAR-измерений, региональных аллометрических уравнений и изображений Landsat.
- GlobBiomass (<https://globbiomass.org>) [28] — проект Европейского космического агентства (ESA) с данными за 2010 г. Карта AGB построена путем объединения

спутниковых радарных наблюдений (SAR) ALOS PALSAR и Envisat ASAR. Наблюдения SAR служили предикторами в модели поиска, для оценки параметров использовались метрики на основе лидарных наблюдений за 2003–2009 гг. и коэффициенты отражения Landsat-7 за 2010 г. Валидация полученной карты по базе данных из 110 897 наземных измерений AGB показала высокое соответствие результатов.

- ESA Biomass Climate Change Initiative (<https://climate.esa.int/en/projects/biomass>) — развитие проекта GlobBiomass, содержит оценки AGB за 2010, 2017 и 2018 гг. с разрешением 100 м, полученные из комбинации спутниковых радарных данных Sentinel-1, Envisat ASAR, ALOS PALSAR. Для калибровки модели были взяты данные LiDAR ICESat и GEDI, растровые базы данных: карты плотности растительного покрова MODIS, Landsat, AVHRR, CCI, высоты DEM, климатические переменные Worldclim, аллометрические уравнения связи данных LiDAR и AGB.

Для связи наборов данных AGB с параметрами возраста и вида деревьев служат нормативные материалы динамики биологической продуктивности насаждений в виде таблиц. Такие таблицы предоставляют информацию о динамике фитомассы по частям дерева, чистой первичной продукции по породам и возрастам в разных лесорастительных зонах. Под фитомассой понимается количество органического вещества живых растений лесной экосистемы. При этом показателю AGB соответствует параметр количества фитомассы надземного древостоя, т/га. Информация о соответствии объемов биомассы определенным породам и возрастам деревьев для исследуемой области была взята из [29].

1.4. Климат

Климатические данные для лесных моделей обычно включают среднемесячные значения минимальной и максимальной температуры воздуха, количество осадков. В качестве пространственной климатической базы данных мы использовали WorldClim (<https://www.worldclim.org>), в которой собраны исторические климатические данные с пространственным разрешением от 30 с (примерно 1 км²) до 10 мин (примерно 340 км²). WorldClim предоставляет данные двух видов: средние данные за период 1970–2000 гг. и ежемесячные с 1960 по 2018 г. Оба вида представлены в виде набора GeoTiff-файлов (.tif) и включают среднюю минимальную и максимальную температуру воздуха в градусах Цельсия и общее количество осадков в миллиметрах. Дополнительно для расширения Biomass Succession нужны значения эвапотранспирации по районам области исследования. Их можно получить из продукта спутника Terra/MODIS MOD16A3GF version 6.1 Evapotranspiration/Latent Heat Flux (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3gfv061>). Он содержит данные суммарной эвапотранспирации за год с разрешением 500 м и глобальным покрытием, начиная с 2000 г. и по настоящее время.

1.5. Участки и экорегионы

Наименьшей единицей территории в LANDIS-II считается участок, однородный по своим характеристикам. Если участок лежит за пределами области интереса или состоит из нелесных земель, он помечается как неактивный. Для создания карты участков была выбрана векторная карта кварталов Голоустненского лесничества из материалов лес-

ной инвентаризации. В LANDIS-II область исследования разбивается на экорегионы — одну или несколько ячеек, объединенных похожим климатом или почвой.

Данные о почвах региона можно получить из региональных почвенных карт, в настоящей работе использован Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (<http://egrpr.soil.msu.ru>). Он содержит почвенную карту России масштаба 1:2 500 000 с данными об основном почвенном комплексе выдела, сопутствующих почвах и почвообразующих породах.

2. Результаты

2.1. Инициализация модели

Для инициализации модели LANDIS-II последовательно была составлена карта экорегионов и породно-возрастного состава территории. Обработка векторных и растровых данных проводилась с помощью QGIS 3.30, для сопоставления классов возраста по объему биомассы создан скрипт на Python 3.7.

2.1.1. Составление карты экорегионов

Для составления карты экорегионов из почвенной карты России выделены полигоны, лежащие в Голоустненском лесничестве. В анализе для каждого из них участвовали атрибуты: наименование основной почвы, сопутствующая почва и почвообразующие породы. Дополнительно были загружены климатические данные с WorldClim: количество осадков, минимальная и максимальная температура в виде средних за 1970–2000 гг. месячных значений с пространственным разрешением 30 с, а также карта высот (рис. 1). В режиме пакетной обработки QGIS все климатические и высотные растры обрезаны по границам области исследования, затем для каждого полигона почвы вычислены средние значения атрибутов.

Из собранных в табл. 2 данных видно, что параметры почв у полигонов 2 и 5 совпадают, но они заметно различаются по количеству осадков (384.49 и 421.79 мм) и высоте (870.11 и 848.83 м), поэтому объединить их нельзя. Полигон 3 по характеристикам почвы близок к полигонам 2 и 5, но отличается от них всеми климатическими параметрами. В результате было решено объединить только полигоны 3 и 7 для удобства расчетов, так как значения климатических переменных полигона 7 близки к значениям полигона 3. Результатная карта экорегионов содержит шесть активных полигонов.

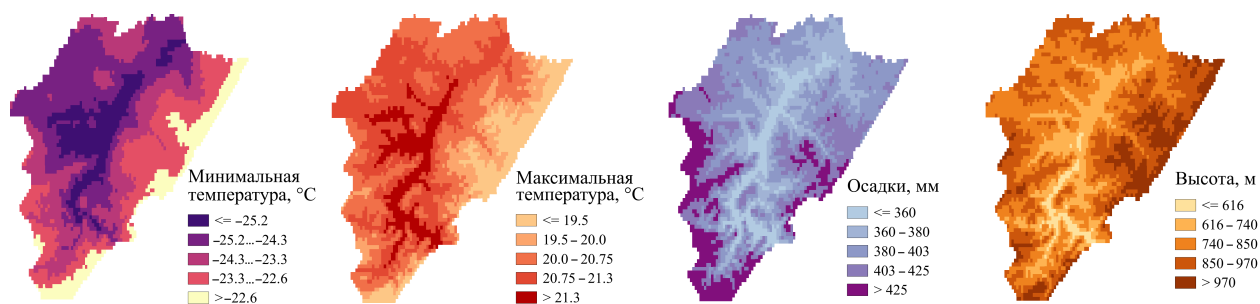


Рис. 1. Тематические данные: минимальная и максимальная температура, количество осадков, высота над уровнем моря

Fig. 1. Thematic data: minimum and maximum temperature, precipitation, elevation

Т а б л и ц а 2. Параметры полигонов
Table 2. Polygon parameters

| № полигона | Осадки, мм | Температура, °С | | Высота, м | Площадь, га | Почвы |
|------------|------------|-----------------|-------------|-----------|-------------|---|
| | | максимальная | минимальная | | | |
| 4 | 399.97 | 20.7 | -24.47 | 848.53 | 21 923.5 | Дерново-карбонатные/дерново-подзолистые/известняки |
| 5 | 421.79 | 20.59 | -23.73 | 848.83 | 53 336.39 | Дерново-подзолистые/таежные глеевые гумусово-перегнойные/сланцы и песчаники |
| 2 | 384.49 | 20.3 | -24.06 | 870.11 | 10 785.11 | Дерново-подзолистые/таежные глеевые гумусово-перегнойные/сланцы и песчаники |
| 1 | 379.73 | 21 | -24.68 | 756.3 | 83 873.44 | Дерново-таежные кислые/таежные глеевые гумусово-перегнойные/сланцы |
| 6 | 400.59 | 19.93 | -23.17 | 907.58 | 38 734.24 | Дерново-подзолистые/подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые/песчаники и сланцы |
| 3 | 408 | 19.34 | -22.4 | 972.33 | 14 907.39 | Дерново-подзолистые/сланцы |
| 7 | 415.94 | 18.9 | -22.02 | 1028.44 | 1654.8 | Дерново-таежные кислые/кислые метаморфические и изверженные |

При моделировании экорегион можно пометить как неактивный, чтобы исключить отдельные области (например, площади рек, поля) из расчетов. На вход LANDIS-II подается растровая карта прямоугольной формы, поэтому в качестве неактивного экорегиона была помечена площадь, лежащая вне области исследования в ограничивающем прямоугольнике.

2.1.2. Составление карты породно-возрастного состава

Процесс сбора данных для инициализации модели был начат с выбора продукта классификации земной поверхности. Для этого данные FROM-GLC-2015 и GLC_FCS30-2020 были приведены к одному набору классов, подсчитаны их площади, для лесных классов значения сравнивались с данными суммарных площадей из лесной инвентаризации за 2018 г. из «Лесного плана Иркутской области на 2019–2028 годы» [30]. Дополнительно в QGIS с помощью плагина AsATaMa рассчитаны значения общей точности, средняя точность производителя (Producer accuracy) и пользователя (User accuracy). Для оценки точности было сгенерировано 200 точек, случайно распределенных по области исследования. Каждой точке сопоставлен класс земной поверхности с помощью визуального дешифрирования по спутниковым снимкам высокого разрешения Google Maps. Далее классы последовательно сравнивались с классами в этих точках у FROM-GLC-2015 и GLC_FCS30-2020, была построена матрица ошибок и вычислены параметры точности.

В результате продукт GLC_FCS30-2020 показал как более высокое значение общей точности, так и более высокие значения точности производителя и пользовате-

ля, включая лесные классы (табл. 3). По размеру площади хвойных лесов значение FROM-GLC-2015 получилось ближе к учетным данным, по лиственным лесам, если рассматривать их площадь совместно со смешанными, оба продукта показали близкие к учетным значения. Также преимуществом GLC_FCS30-2020 выступило наличие класса Deciduous needle-leaved forest, что позволило дополнительно к классам хвойного и лиственного леса выделить класс “лиственница”. Выделение этого вида в отдельный класс улучшит точность моделирования. Поэтому для дальнейшей работы выбран продукт GLC_FCS30-2020.

Виды деревьев области исследования объединены в группы — хвойные (сосна, ель, пихта, кедр), лиственница и лиственные (береза, осина). Для получения карты началь-

Т а б л и ц а 3. Сравнение площадей и точности продуктов классификации земной поверхности
Table 3. Comparison of area and accuracy of land surface classification products

| Класс | Учетные, га | GLC_FCS30-2020 | | | FROM-GLC-2015 | | |
|---------------------|-------------|----------------|------------------------|-----------------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| | | Площадь, га | Точность производителя | Точность пользователя | Площадь, га | Точность производителя | Точность пользователя |
| “Трава”, “пастбище” | — | 2443.51 | 1.0 | 0.2 | 12 260.9 | 0.5 | 0.11 |
| “Лиственный лес” | 44 962 | 21 588.8 | 0.7 | 0.56 | 9710.6 | 0.25 | 0.83 |
| “Хвойный лес” | 156 886 | 176 088.2 | 0.7 | 0.81 | 153 862.6 | 0.7 | 0.64 |
| “Лиственница” | 26 469 | 72 993.2 | — | — | — | — | — |
| “Смешанный лес” | — | 24 561.6 | 0.72 | 0.97 | 33 369.1 | 0.72 | 0.68 |
| “Кустарник” | 5865 | 194.57 | 0 | 0 | 0.0456 | 0 | 0 |
| “Редколесье” | — | 21.36 | 0.54 | 0.7 | 1.87 | 0 | 0 |
| “Строения” | — | 115.32 | 1.0 | 1.0 | 3.012 | 0 | 0 |
| “открытая земля” | — | 140.88 | 0 | 0 | 15 996.7 | 0.44 | 0.29 |
| “Вода” | — | 9.13 | 1.0 | 1.0 | 6.0 | 0.4 | 1.0 |
| Общая точность | — | 0.65 | — | — | 0.57 | — | — |

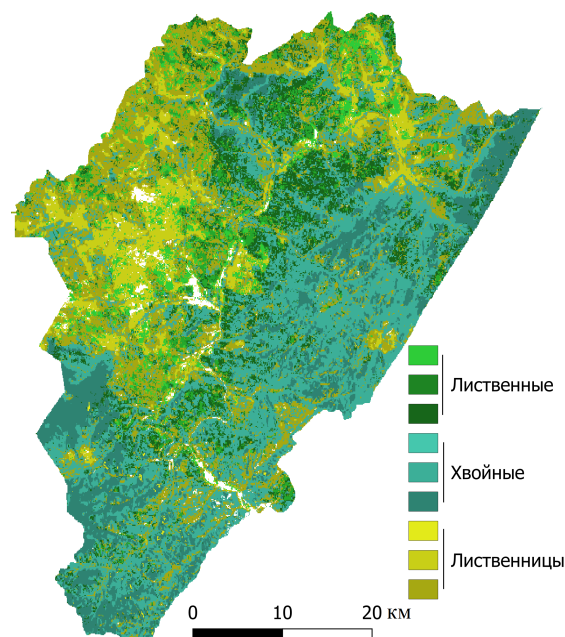


Рис. 2. Полученная карта породно-возрастного состава

Fig. 2. The resulting map of the tree species and age composition

ного состояния взят объем биомассы в виде карты AGB ESA Biomass Climate Change Initiative за 2018 г. (файл формата TIF). Выбор ESA Biomass обусловлен тем, что эти данные самые свежие из рассмотренных — 2018 г., и именно за 2018 г. есть для сравнения данные инвентаризации из “Лесного плана” суммарных площадей лесничества по породам и классам возраста.

На территории Голоустненского лесничества из карты квартальной сети выделено 615 участков, после ее пространственного объединения с картой экорегионов их количество увеличилось до 835. Полученные полигоны площадью менее 5 га были объединены с соседними, после чего на резульатной карте остался 791 участок.

Для вычисления значений в QGIS были наложены слои земной поверхности GLC_FC S30-2020, AGB ESA Biomass и карта участков. Полученная резульатная карта обработана скриптом Python, в котором для каждого участка сети собиралась информация об имеющихся на нем породах и классах возраста. Из данных породно-возрастного состава сформирована карта начального состояния участков для LANDIS-II (рис. 2), более темные оттенки в каждой группе пород соответствуют более старым деревьям.

2.2. Расчеты по модели

Biomass Succession моделирует динамику биомассы каждой когорты в зависимости от возраста, конкуренции и воздействий. Расширение не включает возможные антропогенные воздействия на лес и нарушения, рассматривая только естественную сукцессию. Для Biomass Succession в качестве начальных дополнительно требуются данные по биомассе и климату. Данные по биомассе включают параметры максимальной чистой первичной продукции (ANPP) и суммарной биомассы (AGB) для каждого вида в каждом экорегионе, которые были подсчитаны по [29] для всех групп пород.

Также для каждого экорегиона определены средние значения эвапотранспирации на основе продукта MOD16A3GF за 2018 г., для климатической библиотеки подготовлен файл со значениями влажности, минимальной и максимальной температуры по месяцам по данным WorldClim.

При моделировании расширением Biomass Succession для Голоустненского лесничества на 200 лет были получены результаты динамики биомассы по классам пород (табл. 4) и карты динамики суммарного объема биомассы (рис. 3 и 4). Из табл. 4 видно, как суммарный объем биомассы постепенно снижается первые 80 лет, затем в течение следующих 80 лет наблюдается ее рост, за которым опять следует спад (рис. 5). Динамика биомассы лиственных пород примерно повторяет тенденцию общего объема, отличаясь более резким снижением в первые 80 лет. Биомасса вечнозеленых хвойных пород непрерывно растет на протяжении первых 160 лет, что связано с более длинным сроком жизни хвойных деревьев. У биомассы лиственных пород снижение наблюдается в первые 40 лет, затем следует 80 лет его увеличения, за которым опять следует спад.

На картах биомассы (см. рис. 3 и 4) отражена пространственная динамика суммарной биомассы по всем породам. На рисунках видно, что в начале моделирования большие объемы биомассы сосредоточены в северной и восточной частях лесничества. Через 80 лет в этих частях биомасса значительно уменьшается, через 150 — заметен ее прирост на всей территории лесничества, а через 200 лет в юго-восточной части наблюдается снижение.

При рассмотрении динамики биомассы только хвойных пород видны отличия (см. рис. 4) от суммарной картины: в начале моделирования биомасса концентрируется

Т а б л и ц а 4. Результаты расчетов биомассы

Table 4. Results for calculations of biomass

| Время | AGB, г/м ² | | | |
|-------|-----------------------|-----------|-------------|---------------|
| | лиственные | хвойные | лиственница | среднее общее |
| 0 | 12 098.08 | 29 370.81 | 88 953.44 | 130 422.31 |
| 20 | 10 243.85 | 33 127.43 | 86 863.45 | 130 234.7 |
| 40 | 8688.92 | 36 400.98 | 75 824.36 | 120 914.3 |
| 60 | 10 250.85 | 38 963.39 | 58 587.73 | 107 801.9 |
| 80 | 14 753.91 | 40 782.42 | 43 532.07 | 99 068.5 |
| 100 | 18 488.98 | 43 846.9 | 40 182.48 | 102 518.3 |
| 120 | 19 395.27 | 51 348.85 | 47 112.93 | 117 857 |
| 140 | 132 352.8 | 16 496.99 | 60 110.61 | 132 352.8 |
| 160 | 11 625.67 | 64 163.5 | 59 834.49 | 135 623.8 |
| 180 | 7987.67 | 62 535.86 | 58 771.82 | 129 295.3 |
| 200 | 7377.14 | 57 349.86 | 54 386.92 | 119 113.9 |

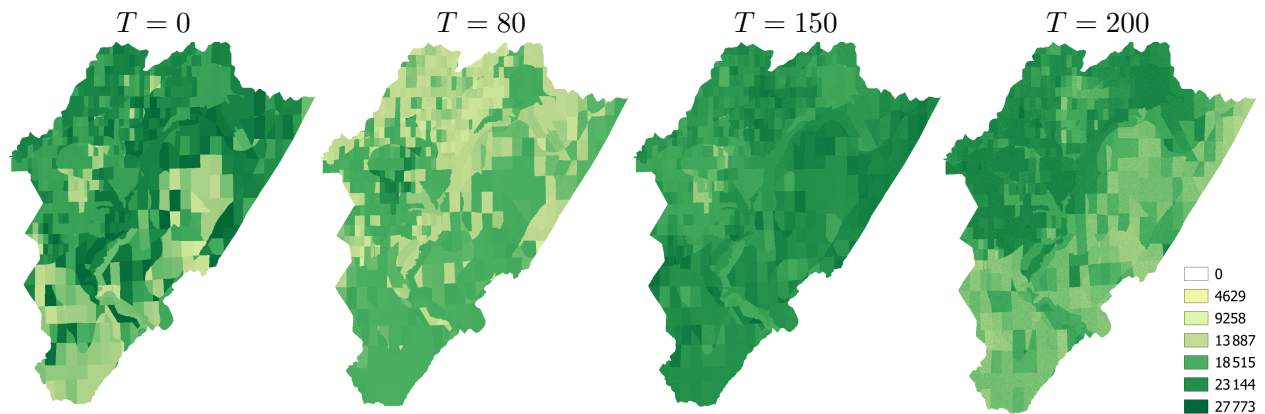


Рис. 3. Динамика суммарной биомассы по годам: начальный момент времени, через 80, 150 и 200 лет с начала моделирования

Fig. 3. The total output AGB maps by years: initial time, after 80, 150, and 200 years from the beginning of the simulation

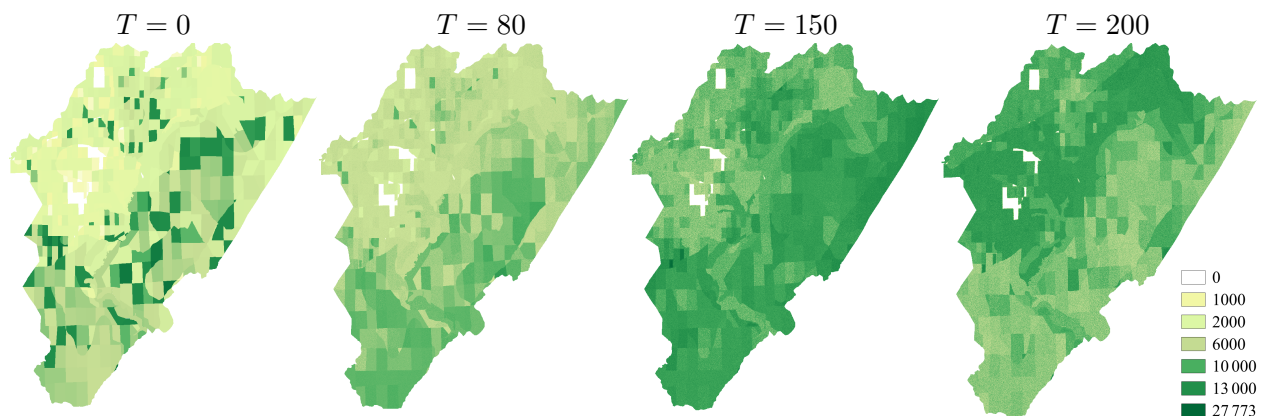


Рис. 4. Динамика биомассы хвойных пород по годам: начальный момент времени, через 80, 150 и 200 лет с начала моделирования

Fig. 4. The coniferous AGB dynamic maps by years: initial time, after 80, 150, and 200 years from the beginning of the simulation

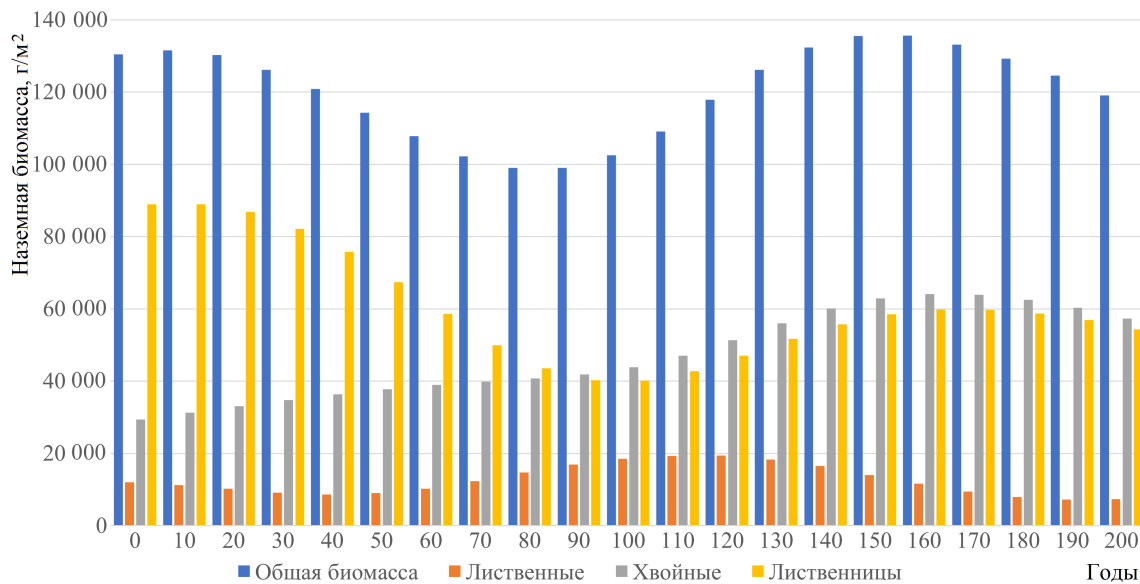


Рис. 5. График динамики биомассы по классам пород
 Fig. 5. Biomass dynamics by species classes

в юго-восточной части, через 80 и 150 лет мы видим плавный рост хвойных по всей территории, через 200 лет в юго-восточной части начинается снижение, а в северо-западной продолжается увеличение биомассы.

Заключение

В работе представлена методика сбора начальных данных для инициализации моделей лесных ландшафтов из открытых источников. В исследовании описаны разные типы спутниковых и альтернативных данных, совмещение которых позволило создать исходную карту породно-возрастного состава и задать начальные параметры модели LANDIS-II, используя только данные из открытых источников. Основные из использованных наборов данных являются глобальными, а их достоверность подтверждена сравнением с данными натурных наблюдений, поэтому разработанная нами методика может использоваться для других областей исследования.

Результаты моделирования по Голоустненскому лесничеству показали, что модель LANDIS-II позволяет получать интересные прогнозные данные. Информация о пространственной динамике биомассы различных пород деревьев помогает увидеть будущее состояние территории, спрогнозировать изменения в структуре и функционировании лесов в ответ на климатические, антропогенные и другие факторы. В дальнейшем планируется добавить в модель информацию о рубках, пожарах и других воздействиях, провести расчеты по расширениям LANDIS-II, позволяющим прогнозировать запасы углерода в лесу, учитывать разные климатические сценарии.

Благодарности. Работа проведена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”). Результаты получены с исполь-

зованием возможностей Центра коллективного пользования “Интегрированная информационная сеть Иркутского научно-образовательного комплекса”.

Список литературы

- [1] **Porte A., Bartelink H.H.** Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling*. 2002; 150(1–2):141–188.
- [2] **Acevedo M.F., Urban D.L., Shugart H.H.** Models of forest dynamics based on roles of tree species. *Ecological Modelling*. 1996; 87(1–3):267–284.
- [3] **Vladimirov I.N., Chudnenko A.K.** Multilevel modeling of the forest resource dynamics. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2009; 4(5):72–88. DOI:10.1051/mmnp/20094505.
- [4] **Burkhardt H.E., Tome M.** Modeling forest trees and stands. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2012: 457.
- [5] **Xi W., Coulson R.N., Birt A.G., Shang Z., Waldron J.D., Lafon C.W., Cairns D.M., Tchakerian M.D., Klepzig K.D.** Review of forest landscape models: types, methods, development and applications. *Acta Ecologica Sinica*. 2009; (29):69–78.
- [6] **Cosofret C., Duduman G., Barnoaiea I., Bouriaud O.** Management or climate and which one has the greatest impact on forest soil’s protective value? A case study in Romanian Mountains. *Forests*. 2022; (13):916. DOI:10.3390/f13060916.
- [7] **Scheller R.M., Domingo J.B., Sturtevant B.R., Williams J.S., Rudy A., Gustafson E.J., Mladenoff D.J.** Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*. 2007; 201(3–4):409–419. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009.
- [8] **He H.S., Li W., Sturtevant B.R., Yang J., Shang B.Z., Gustafson E.J., Mladenoff D.J.** LANDIS: a spatially explicit model of forest landscape disturbance, management, and succession. *LANDIS 4.0 users guide*. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station; 2004: 93.
- [9] **Scheller R.M., Mladenoff D.J.** A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: design, validation, and application. *Ecological Modelling*. 2004; (180):211–229. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.022.
- [10] **Suárez-Muñoz M., Mina M., Salazar P.C., Navarro-Cerrillo R.M., Quero J.L., Bonet-García F.J.** A step-by-step guide to initialize and calibrate landscape models: a case study in the Mediterranean Mountains. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2021; (9):653393. DOI:10.3389/fevo.2021.653393.
- [11] **Tremblay J.A., Boulanger Y., Cyr D., Taylor A.R., Price D.T., St-Laurent M.H.** Harvesting interacts with climate change to affect future habitat quality of a focal species in Eastern Canada’s boreal forest. *PLoS ONE*. 2018; 13(2):e0191645. DOI:10.1371/journal.pone.0191645.
- [12] **Molina E., Valeria O., Martin M., Montoro Girona M., Ramirez J.A.** Long-term impacts of forest management practices under climate change on structure, composition, and fragmentation of the Canadian boreal landscape. *Forests*. 2022; (13):1292. DOI:10.3390/f13081292.
- [13] **Maxwell C.J., Scheller R.M., Wilson K.N., Manley P.N.** Assessing the effectiveness of landscape-scale forest adaptation actions to improve resilience under projected climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022; (5):740869. DOI:10.3389/ffgc.2022.740869.
- [14] **Low M., Koukal T.** Phenology modelling and forest disturbance mapping with Sentinel-2 time series in Austria. *Remote Sensing*. 2020; (12):4191. DOI:10.3390/rs12244191.

-
- [15] **Fick S.E., Hijmans R.J.** WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017; 37(12):4302–4315. DOI:10.1002/joc.5086.
- [16] **Mu Q., Zhao M., Running S.** Brief introduction to MODIS evapotranspiration data set (MOD16). *Water Resources Research*. 2005; (45):1–4.
- [17] **Popova A.K., Cherkasin E.A., Vladimirov I.N.** Forest resources of the Baikal Region: vegetation dynamics under anthropogenic use. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2019; (1):96–106. DOI:10.1007/978-3-030-11720-7_14.
- [18] **Sturtevant B.R., Gustafson E.J., Li W., He H.S.** Modeling biological disturbances in LANDIS: a module description and demonstration using spruce budworm. *Ecological Modelling*. 2004; 180(1):153–174. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.021.
- [19] **Axelsson A., Lindberg E., Reese H., Olsson H.** Tree species classification using Sentinel-2 imagery and Bayesian inference. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021; (100):102318. DOI:10.1016/j.jag.2021.102318.
- [20] **Grabska E., Frantz D., Ostapowicz K.** Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians. *Remote Sensing of Environment*. 2020; (251):112103. DOI:10.1016/j.rse.2020.112103.
- [21] **Jombo S., Adam E., Odindi J.** Classification of tree species in a heterogeneous urban environment using object-based ensemble analysis and WorldView-2 satellite imagery. *Applied Geomatics*. 2021; 13(3):373–387. DOI:10.1007/s12518-021-00358-3.
- [22] **Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K.** Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*. 2019; (11):1197. DOI:10.3390/rs11101197.
- [23] **Zhang T., Su J., Xu Z., Luo Y., Li J.** Sentinel-2 satellite imagery for urban land cover classification by optimized random forest classifier. *Applied Sciences*. 2021; (11):543. DOI:10.3390/app11020543.
- [24] **Anand A., Pandey M.K., Srivastava P.K., Gupta A., Khan M.L.** Integrating multisensors data for species distribution mapping using deep learning and envelope models. *Remote Sensing*. 2021; (13):3284. DOI:10.3390/rs13163284.
- [25] **Soleimannejad L., Ullah S., Abedi R., Dees M., Koch B.** Evaluating the potential of Sentinel-2, Landsat-8, and IRS satellite images in tree species classification of hyrcanian forest of Iran using random forest. *Journal of Sustainable Forestry*. 2019; 38(7):615–628. DOI:10.1080/10549811.2019.1598443.
- [26] **Persson M., Lindberg E., Reese H.** Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*. 2018; (10):1794. DOI:10.3390/rs10111794.
- [27] **Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J.** GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*. 2021; (13):2753–2776.
- [28] **Santoro M., Cartus O., Carvalhais N., Rozendaal D.M.A., Avitabile V., et al.** The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations. *Earth System Science Data*. 2021; (13):3927–3950.
- [29] **Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И.** Таблицы и модели роста и продуктивности основных лесообразующих пород Северной Евразии. М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, Международный институт прикладного системного анализа; 2008: 886.
- [30] Лесной план Иркутской области на 2019–2028 годы. Приложение к Указу губернатора Иркутской области № 112-уг от 29.05.2019. Иркутск; 2019: 217.
-

Preparation of initial data for forest resource models based on remote sensing data

A. K. POPOVA

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

*Corresponding author: Anastasia K. Popova, e-mail: chudnenko@icc.ru

Received October 10, 2023, accepted October 17, 2023.

Abstract

Models for forest dynamic allow estimating different scenarios of ecosystem change, which are necessary for making decisions on reforestation, planning for logging, forest protection and conservation measures. The initial data for such models usually comprises of the data on the distribution of trees of certain species and age in the study area. The paper proposes a methodology for processing data from open sources, which can be used to prepare initial data for forest resource models. Different sources of initial data for models are compared.

Keywords: satellite data, forest resource models, forest dynamics simulation, remote sensing data.

Citation: Popova A.K. Preparation of initial data for forest resource models based on remote sensing data. Computational Technologies. 2023; 28(6):135–150. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.012. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant No. 075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project “Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory”). Some results were obtained using the facilities of the Centre of collective usage “Integrated information network of Irkutsk scientific educational complex”.

References

1. **Porte A., Bartelink H.H.** Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling*. 2002; 150(1–2):141–188.
2. **Acevedo M.F., Urban D.L., Shugart H.H.** Models of forest dynamics based on roles of tree species. *Ecological Modelling*. 1996; 87(1–3):267–284.
3. **Vladimirov I.N., Chudnenko A.K.** Multilevel modeling of the forest resource dynamics. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2009; 4(5):72–88. DOI:10.1051/mmnp/20094505.
4. **Burkhardt H.E., Tome M.** Modeling forest trees and stands. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2012: 457.
5. **Xi W., Coulson R.N., Birt A.G., Shang Z., Waldron J.D., Lafon C.W., Cairns D.M., Tchakerian M.D., Klepzig K.D.** Review of forest landscape models: types, methods, development and applications. *Acta Ecologica Sinica*. 2009; (29):69–78.
6. **Cosofret C., Duduman G., Barnoaiea I., Bouriaud O.** Management or climate and which one has the greatest impact on forest soil’s protective value? A case study in Romanian Mountains. *Forests*. 2022; (13):916. DOI:10.3390/f13060916.
7. **Scheller R.M., Domingo J.B., Sturtevant B.R., Williams J.S., Rudy A., Gustafson E.J., Mladenoff D.J.** Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*. 2007; 201(3–4):409–419. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009.

8. **He H.S., Li W., Sturtevant B.R., Yang J., Shang B.Z., Gustafson E.J., Mladenoff D.J.** LANDIS: a spatially explicit model of forest landscape disturbance, management, and succession. LANDIS 4.0 users guide. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station; 2004: 93.
9. **Scheller R.M., Mladenoff D.J.** A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: design, validation, and application. *Ecological Modelling*. 2004; (180):211–229. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.022.
10. **Suárez-Muñoz M., Mina M., Salazar P.C., Navarro-Cerrillo R.M., Quero J.L., Bonet-García F.J.** A step-by-step guide to initialize and calibrate landscape models: a case study in the Mediterranean Mountains. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2021; (9):653393. DOI:10.3389/fevo.2021.653393.
11. **Tremblay J.A., Boulanger Y., Cyr D., Taylor A.R., Price D.T., St-Laurent M.H.** Harvesting interacts with climate change to affect future habitat quality of a focal species in Eastern Canada's boreal forest. *PLoS ONE*. 2018; 13(2):e0191645. DOI:10.1371/journal.pone.0191645.
12. **Molina E., Valeria O., Martin M., Montoro Girona M., Ramirez J.A.** Long-term impacts of forest management practices under climate change on structure, composition, and fragmentation of the Canadian boreal landscape. *Forests*. 2022; (13):1292. DOI:10.3390/f13081292.
13. **Maxwell C.J., Scheller R.M., Wilson K.N., Manley P.N.** Assessing the effectiveness of landscape-scale forest adaptation actions to improve resilience under projected climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022; (5):740869. DOI:10.3389/ffgc.2022.740869.
14. **Low M., Koukal T.** Phenology modelling and forest disturbance mapping with Sentinel-2 time series in Austria. *Remote Sensing*. 2020; (12):4191. DOI:10.3390/rs12244191.
15. **Fick S.E., Hijmans R.J.** WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017; 37(12):4302–4315. DOI:10.1002/joc.5086.
16. **Mu Q., Zhao M., Running S.** Brief introduction to MODIS evapotranspiration data set (MOD16). *Water Resources Research*. 2005; (45):1–4.
17. **Popova A.K., Cherkasin E.A., Vladimirov I.N.** Forest resources of the Baikal region: vegetation dynamics under anthropogenic use. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2019; (1):96–106. DOI:10.1007/978-3-030-11720-7_14.
18. **Sturtevant B.R., Gustafson E.J., Li W., He H.S.** Modeling biological disturbances in LANDIS: a module description and demonstration using spruce budworm. *Ecological Modelling*. 2004; 180(1):153–174. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.021.
19. **Axelsson A., Lindberg E., Reese H., Olsson H.** Tree species classification using Sentinel-2 imagery and Bayesian inference. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021; (100):102318. DOI:10.1016/j.jag.2021.102318.
20. **Grabska E., Frantz D., Ostapowicz K.** Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians. *Remote Sensing of Environment*. 2020; (251):112103. DOI:10.1016/j.rse.2020.112103.
21. **Jombo S., Adam E., Odindi J.** Classification of tree species in a heterogeneous urban environment using object-based ensemble analysis and WorldView-2 satellite imagery. *Applied Geomatics*. 2021; 13(3):373–387. DOI:10.1007/s12518-021-00358-3.
22. **Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K.** Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*. 2019; (11):1197. DOI:10.3390/rs11101197.
23. **Zhang T., Su J., Xu Z., Luo Y., Li J.** Sentinel-2 satellite imagery for urban land cover classification by optimized random forest classifier. *Applied Sciences*. 2021; (11):543. DOI:10.3390/app11020543.
24. **Anand A., Pandey M.K., Srivastava P.K., Gupta A., Khan M.L.** Integrating multisensors data for species distribution mapping using deep learning and envelope models. *Remote Sensing*. 2021; (13):3284. DOI:10.3390/rs13163284.
25. **Soleimannejad L., Ullah S., Abedi R., Dees M., Koch B.** Evaluating the potential of Sentinel-2, Landsat-8, and IRS satellite images in tree species classification of hyrcanian forest of Iran using random forest. *Journal of Sustainable Forestry*. 2019; 38(7):615–628. DOI:10.1080/10549811.2019.1598443.
26. **Persson M., Lindberg E., Reese H.** Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*. 2018; (10):1794. DOI:10.3390/rs10111794.

27. **Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J.** GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*. 2021; (13):2753–2776.
28. **Santoro M., Cartus O., Carvalhais N., Rozendaal D.M.A., Avitabile V., et al.** The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations. *Earth System Science Data*. 2021; (13):3927–3950.
29. **Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Nilsson S., Buluy Yu.I.** Tablitsy i modeli rosta i produktivnosti osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoy Evrazii [Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia]. Moscow: Federal'noe Agenstvo Lesnogo Khozyaystva, Mezhdunarodnyy Institut Prikladnogo Sistemnogo Analiza; 2008: 886. (In Russ.)
30. Lesnoy plan Irkutskoy oblasti na 2019–2028 gody. Prilozhenie k Ukazu gubernatora Irkutskoy oblasti No. 112-ug ot 29.05.2019 [Forest plan of the Irkutsk Region 2019–2028. Appendix to the Decree of the Governor of the Irkutsk Region dated May 29, 2019 No. 112-ug]. Irkutsk; 2019: 217. (In Russ.)